

**РАЗРАБОТКА РЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ И
ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

А.Б. Кувалдин, д.т.н., проф., М.А. Федин, к.т.н., доц., А.О. Кулешов

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»

111250, г. Москва Красноказаренная улица 14, тел. (495)-362-75-60

E-mail: AOKuleschov@yandex.ru

Аннотация: Разработаны физические модели индукционных тигельных печей с непроводящим и проводящим тиглем. Проведено экспериментальное исследование параметров индукционной тигельной печи для плавки ферромагнитной кусковой шихты в непроводящем тигле. Проведено экспериментальное исследование параметров печи для плавки меди и магния в проводящих тиглях. На основании экспериментальных данных разработаны: трехпозиционная система управления активной мощностью индукционной тигельной печи для плавки ферромагнитной кусковой шихты, двухпозиционная система управления температурным режимом индукционных тигельных печей с проводящим тиглем.

Abstract: The physical models of the induction crucible furnaces with nonconducting crucible and conducting crucible were developed. Experimental study of the parameters of an induction crucible furnace for melting of ferromagnetic lumpy charge in ferromagnetic nonconducting crucible was made. Experimental study of the parameters of the furnace for melting copper and magnesium in conducting crucible was made. Three-position control system of active power of induction crucible furnace for melting of ferromagnetic lumpy charge and two-position control system for temperature regime of induction crucible furnaces with conductive crucible were developed.

Индукционные тигельные печи (ИТП) широко применяются в промышленности для плавки черных и цветных металлов, в частности качественных медных и магниевых сплавов. В зависимости от электрических свойств материала тигля различают ИТП с непроводящим и проводящим тиглем.

К первой группе относятся печи с диэлектрическим керамическим тиглем, предназначенные для плавления металлов. В таких печах загрузка (садка) нагревается индуцированным в ней током, тигель же эквивалентен воздушному зазору.

Ко второй группе относятся печи со стальным, графитовым или графито-шамотным тиглем, обладающим большей или меньшей электропроводностью. Если толщина стенки тигля более чем вдвое превышает глубину проникновения тока в материал тигля, то можно считать, что индуцированный ток сосредоточен в стенке тигля, загрузка же прогревается только путем теплопередачи и может не обладать электропроводностью. При меньшей толщине стенки тигля электромагнитное поле проникает в загрузку, и энергия выделяется как в стенке тигля, так и в самой загрузке, если она электропроводна. Печи с проводящим тиглем имеют теплоизоляцию.

Современные установки ИТП требуют автоматизации проводимого в них технологического процесса, контроля и управления электрических (напряжение, ток, мощность, cosφ) и технологических (температура металла) параметров. Поскольку рассматриваемые ИТП являются достаточно инерционными в тепловом отношении объектами управления, практика показывает, что систему регулирования тепловым режимом садки в печах можно строить по релейному принципу. Для выбора параметров системы регулирования печи необходима идентификация ИТП как объектов системы управления с последующим встраиванием модели печи в структурную модель системы регулирования в *MATLAB*.

Идентификация ИТП может проводиться с использованием методов электрического и теплового расчетов или с использованием физического моделирования [1 – 3].

Физическое моделирование позволяет получить наиболее достоверную информацию о натурном объекте. Оно основано на изменении масштаба физических свойств материалов, геометрических размеров системы или параметров, характеризующих режим нагрева, при сохранении физической сущности процессов, происходящих в модели и оригинале [2, 4]. Используя теорию подобия, результаты моделирования можно перенести на печи большей емкости, применяя масштабные коэффициенты.

Для экспериментальных исследований в НИУ «МЭИ» создан лабораторно-промышленный стенд на базе ИТП для плавки меди, алюминия и магния, а также ферромагнитной стали. Экспериментальные исследования проводились для трех металлов: ферромагнитная сталь, медь и магний.

При нагреве ферромагнитной кусковой шихты было проведено физическое моделирование на масштабной модели ИТП. Для моделирования самой кусковой шихты применялись куски стальной проволоки длиной 25 мм двух разных диаметров (2.9 мм и 1.1 мм).

Точное воспроизведение в модели численных значений всех определяющих критериев при большом их числе и при условии геометрического подобия практически невозможно.

На практике, как правило, условия полного подобия не выполняются, что вынуждает переходить на приближенное моделирование, при котором в модели воспроизводится тот же физический процесс, что и в реальном объекте, при частичном нарушении некоторых из пяти условий полного моделирования [5].

Работа проводилась на модельной установке ИТП с керамическим тиглем. Печь питается от транзисторного последовательного инвертора максимальной установленной мощностью 2,5 кВт и частотой 16-21 кГц [3].

На рис. 1 представлен эскиз моделируемой ИТП. Параметры модельной установки следующие: $d_{1м} = 94$ мм, $d_{2м} = 67$ мм, $l_{1м} = 76$ мм, $l_{2м} = 113$ мм, масса загрузки $m_{шм} = 985$ г, частота в начальный момент нагрева шихты, $f_m = 16.8$ кГц, число витков индуктора – 6.

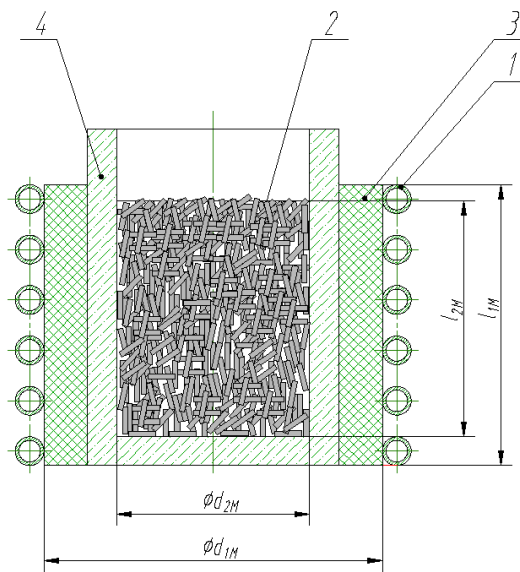


Рис. 1. Чертеж физической модели ИТП:

1 – индуктор; 2 – кусковая загрузка;

3 – теплоизоляция; 4 – огнеупорный тигель

выходе из индуктора, расход охлаждающей воды индуктора с помощью ротаметра с импульсным выходом, температуры на стенке тигля, крышке и подине печи. Дополнительные параметры использовались для косвенного определения тепловых потерь ИТП и средней температуры печи [1, 2, 4]. Для измерения и регистрации аналоговых сигналов использовался ПЛК (программируемый логический контроллер) «Овен ПЛК 150» со встроенными 4 модулями АЦП (аналого-цифровых преобразователей) и модуль аналогового ввода «Овен МВ110-8И» на 8 каналов, который подключен к ПЛК по последовательному асинхронному каналу связи стандарта RS-485 по протоколу Modbus RTU. ПЛК вычисляет среднюю температуру по косвенным параметрам и регулирует подачу энергии в загрузку печи методом двухпозиционного регулирования.

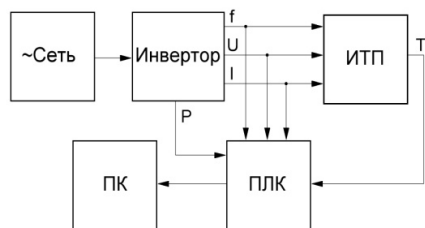


Рис. 2. Функциональная схема лабораторной установки

Параметры модельной установки ИТП можно привести к параметрам большой ИТП согласно теории подобия. Для геометрического подобия имеем:

$$\frac{d_{1п}}{d_{1м}} = \frac{d_{2п}}{d_{2м}} = \frac{l_{1п}}{l_{1м}} = \frac{l_{2п}}{l_{2м}} = \frac{\sqrt{f_m}}{\sqrt{f_p}} = \frac{d_{шп}}{d_{шм}} = \sqrt[3]{\frac{m_{шп}}{m_{шм}}},$$

где $d_{1п}$, $d_{2п}$, $l_{1п}$, $l_{2п}$, f_p , $d_{шп}$, $m_{шп}$ — внутренний диаметр индуктора, диаметр загрузки, высота индуктора, высота загрузки, частота питания, диаметр шихты, масса шихты соответственно для большой печи. Представленную модель можно сопоставить с ИТП для выплавки стали со следующими характеристиками: $d_{1п} = 940$ мм, $d_{2п} = 670$ мм, $l_{1п} = 760$ мм, $l_{2п} = 1130$ мм, частота $f = 170$ Гц, емкость печи составляет 1 тонна.

В ходе эксперимента измерялись значения тока индуктора I , напряжения индуктора U , частоты питающего напряжения f , активной мощности, потребляемой преобразователем частоты P и средней температуры в самой загрузке T (рис. 2). Помимо основных параметров также измерялись дополнительные: температуры воды на входе и

Измеряемые параметры ИТП записывались в файл на персональном компьютере (ПК) с помощью созданной системы автоматизированного сбора данных на базе ПЛК. Далее следует обработка полученного массива экспериментальных данных с последующим анализом результатов.

Из полученных данных вычисляются параметры схемы замещения ИТП $R_{и}$ и $L_{и}$ (активное сопротивление и индуктивность системы «индуктор – загрузка»). Определение $L_{и}$ вместо соответствующего индуктивного сопротивления $X_{и}$ производится по причине того, что в процессе нагрева частота источника питания автоматиче-

чески подстраивается под изменяющуюся нагрузку.

Вычисленные зависимости параметров последовательной схемы замещения ИТП представлены в графическом виде на рис. 3а и 3б, при двух разных диаметрах кусковой шихты из ферромагнитной стали в завалке в виде зависимостей от температуры.

На рис. 3 даны в относительных единицах значения параметров R_u^* и L_u^* , отнесенные к значениям в начале опыта, последовательной электрической схемы замещения системы «индуктор-загрузка», причем в случае рис. 3а начальные значения $R_u = 0.057$ Ом, $L_u = 4$ мкГн, в случае рис. 3б - $R_u = 0.063$ Ом, $L_u = 4$ мкГн. Отношение глубины проникновения поля к диаметру шихты $\Delta/d_{\text{шм}}$ в начальный момент нагрева для случая а) $\Delta/d_{\text{шм}} = 0.17$, б) $\Delta/d_{\text{шм}} = 0.06$ для диаметров шихты 1.1 мм и 2.9 мм соответственно [2].

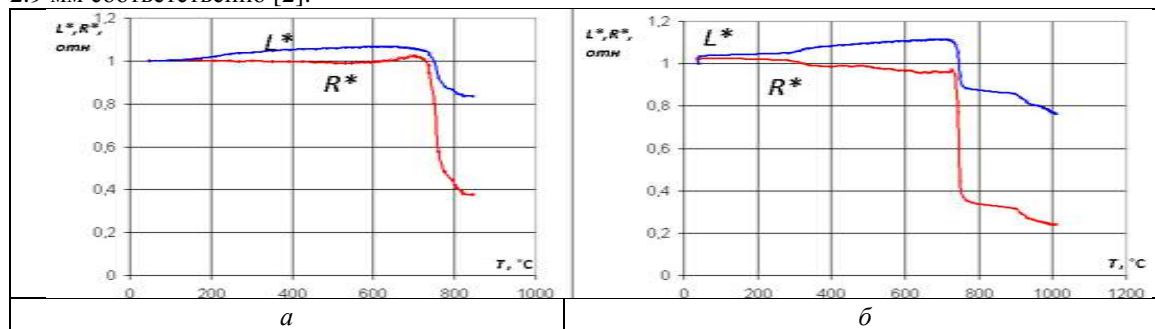


Рис. 3. Зависимости относительных значений общих сопротивления R^* и индуктивности L^* индуктора от температуры для диаметров шихты: а - 2.9 мм; б - 1.1 мм

Из рис. 3 видно, что в процессе нагрева загрузки сильно изменяются параметры ферромагнитной кусковой шихты. В таких условиях для поддержания постоянства мощности в нагрузке в процессе нагрева необходимо регулировать напряжение индуктора, что обычно реализуется при использовании преобразователя частоты с автоподстройкой под параметры ИТП. Используя зависимости изменения параметров загрузки, можно выбрать источник питания необходимой мощности [6, 7]. Полученное в результате экспериментальных исследований математическое описание ИТП используется при синтезе регуляторов мощности и температуры, построенных по релейному принципу [8, 9].

Для нагрева и расплавления металла в ИТП следует поддерживать неизменной мощность, подводимую к шихте в течение всего технологического процесса, так как эта мера позволяет расплавить

загрузку за минимальное время, экономя электрическую энергию. Для этого источнику питания ИТП следует изменять напряжение на индукторе, сохраняя значение мощности, подводимой к нагрузке, максимальным и неизменным. Рассмотрим случай, когда источником питания ИТП является тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ).

Схема ТПЧ, изображенная на рис. 4, обладает широкими возможностями по регулированию

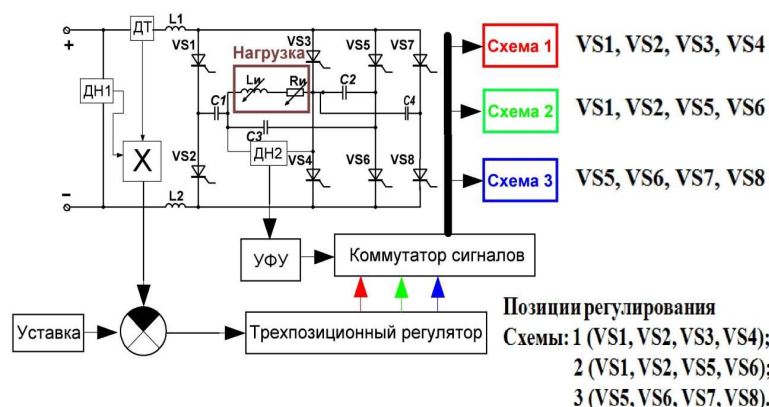


Рис. 4. Структурная схема управления ТПЧ

выходных параметров по причине возможности перестройки своей топологии.

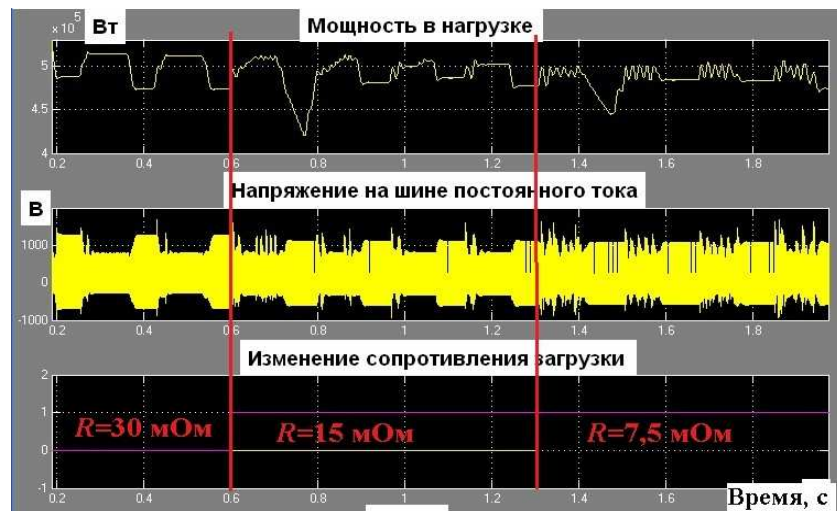


Рис. 5. Диаграммы регулирования мощности при изменении сопротивления нагрузки

Рассматриваемый ТПЧ имеет три различных топологии (рис. 4). Он позволяет реализовать релейное трехпозиционное регулирование активной мощности, поступающей в ИТП. Регулирование параметрами рассматриваемого преобразователя частоты осуществляется по активной мощности, потребляемой преобразователем частоты. Таким образом, перестраиваемый ТПЧ при трёхпозиционном регулировании будет переключаться либо между схемой 1 и схемой 2, либо – между схемой 2 и схемой 3. Среднее значение активной мощности в нагрузке будет соответствовать мощности уставки трёхпозиционного регулятора [10 – 13].

При проведении моделирования были измерены значения средней мощности при отработке системой управления изменений активного сопротивления R в диапазоне $7,5 \div 30$ мОм при $L = 25$ мкГн, причём как при уменьшении сопротивления R , так и при его увеличении. Диаграммы регулирования мощности при изменении сопротивления нагрузки показаны на рис. 5. Из результатов эксперимента на модели следует, что статическая точность регулирования составляет не хуже $\pm 5\%$ при изменении параметров нагрузки ($R = 7,5 \div 30$ мОм и $L = 20 \div 40$ мкГн).

Для плавки меди и магния в ИТП используются проводящие тигли из графита и ферромагнитной стали соответственно. При проведении экспериментальных исследований для регулирования величины входного напряжения используется однофазный лабораторный автотрансформатор F_{nex} мощностью 3 кВА. Для регулирования температуры используется ПЛК «Овен ПЛК 150». Функциональная схема лабораторного стенда показана на рис. 6.

На рис. 7 показан чертеж системы «индуктор – нагрузка» печи с проводящим тиглем с геометрическими размерами.

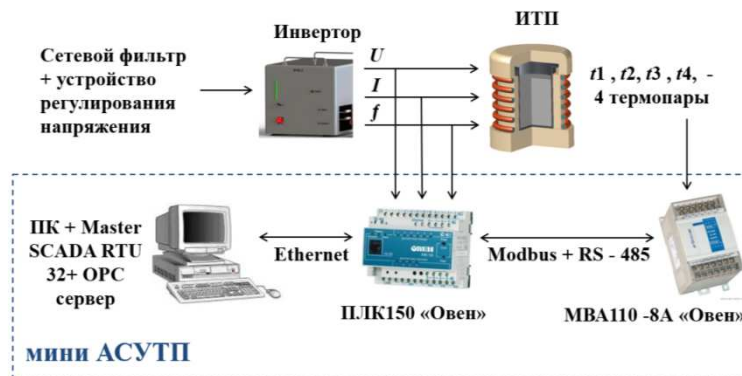


Рис. 6. Функциональная схема лабораторной установки

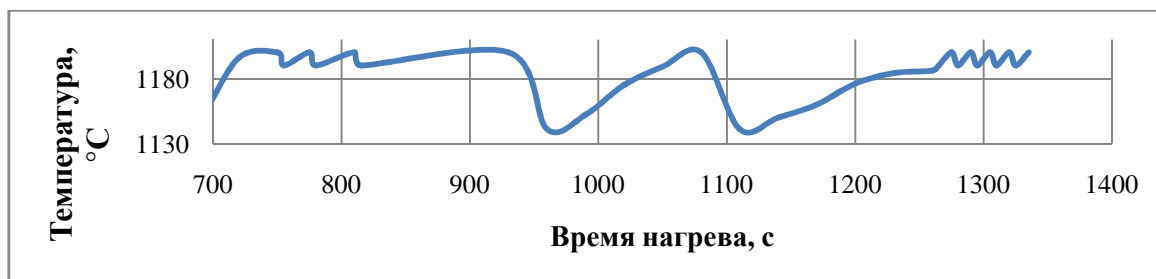


Рис. 10. График зависимости температуры от времени при расплавлении медной шихты

С использованием разработанной модели системы управления можно проводить настройку релейной системы регулирования температуры садки ИТП, работающей в двухпозиционном режиме, в зависимости от емкости печи, мощности источника питания, уровня задающего воздействия, изменения возмущающих воздействий и др.

Заключение

По результатам исследований модели системы управления перестраиваемым ТПЧ в *Simulink* точность регулирования составляет не хуже $\pm 5\%$ в широком диапазоне изменения нагрузки при заданных выше параметрах системы управления.

Применение перестраиваемого ТПЧ, управляемого методом трёхпозиционного регулирования, позволяет снизить потери в преобразовательной установке, сокращая расход электроэнергии при проведении всего процесса плавки стали в ИТП.

Получена структурная модель двухпозиционного регулятора температуры садки ИТП с проводящим тиглем для плавки меди и магния. Приводятся результаты настройки регулятора. Разработанные модели регулятора температуры садки ИТП с проводящим тиглем проверены с использованием экспериментальной установки. Отличия по температуре садки не превышают 5%, что вполне приемлемо.

Поскольку рассматриваемые ИТП являются достаточно инерционными в тепловом отношении объектами (постоянная времени тигля, как правило, составляет более 300 с), систему регулирования тепловым режимом садки можно строить по двухпозиционному принципу.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (инициативный научный проект 8.9608.2017/БЧ).

Литература.

1. Aleksandr Kuvaldin, Maxim Fedin, Ivan Generalov. Determination electrical parameters lumpy ferromagnetic charge when heated to the Curie point // Proc. of the Conf. "Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering" AMTEE'15. – Třebíč, Czech Republic, 2015. – P. I-2.
2. А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, И.М. Генералов. Физическая модель для определения характеристик индукционной тигельной печи при нагреве ферромагнитной кусковой шихты // Индукционный нагрев. – 2015. – №1 (28). – С. 3 – 8.
3. Федин М. А. Выбор принципа регулирования и разработка системы управления индукционных тигельных печей с проводящим тиглем // Индукционный нагрев. – 2014. – №1 (27). – С. 24-28.
4. Кувалдин А. Б., Федин М. А., Генералов И. М. Повышение энергетической эффективности электротехнологического комплекса с индукционной тигельной печью при плавке ферромагнитной кусковой загрузки // Промышленная энергетика. – 2016. – № 5. – С. 19 – 25.
5. Архипов В. А., Березиков А. П. Основы теории инженерно-физического эксперимента: учебное пособие. – Томск: Изд. Томского политехнического ун-та, 2008. – 206 с.
6. Гитгарц Д.А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.
7. Автоматическое управление электротермическими установками / Под ред. Свенчанского А.Д. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
8. Казанцев Ю. М. Прямой синтез управления в преобразовательной технике // Электротехника. – 2000. – №4. – С. 31 – 36.
9. Казанцев Ю. М., Лекарев А. Ф., Тихонов Е. Г. Синтез управления следящими инверторами систем электропитания // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – №6. – С. 20 – 25.
10. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

11. Цыпкин Я.З. Релейные автоматические системы. – М.: Наука, 1974. – 575 с.
12. Шапиро С.В., Зинин Ю.М., Иванов А.В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 166 с.
13. Гальперин М. В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.

ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ ИТ-РИСКАМИ В ОРГАНИЗАЦИЯХ

Л.С. Мухамедиева, преп., А.С. Бейсенова, преп., Б.Р. Жолмагамбетова, ст.преп.

Карагандинский государственный технический университет

100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56

E-mail: l-muhamedieva@mail.ru

Аннотация: В статье рассмотрены методы оценки и управления информационными рисками. Выделены технические и корпоративные факторы риска. Проанализированы современные особенности утечки конфиденциальной информации. Дана характеристика подходов к управлению ИТ рисками.

Abstract: In the article methods of an estimation and management of information risks are considered. Defined technical and corporate risk-factors Analyzed the current singularities of leakage of confidential information. The characteristics of approaches to the governance of IT risks.

В то время как информация всегда являлась ценным и важным ресурсом, сейчас, в эпоху экономики знаний и цифровой революции, организации становятся всё более зависимы от информации, её обработки и, особенно, от информационных технологий. В связи с этим, события, влияющие каким либо образом на ИТ, могут оказать неблагоприятные воздействия на бизнес-процессы[1]. Оценка вероятности правдоподобности различных типов событий с расчетом их возможных последствий это распространенный способ оценки и измерения ИТ риска[2]. Альтернативные методы измерения ИТ рисков обычно включают в себя оценивание сопутствующих факторов, таких как, например, угрозы, уязвимости и величина активов.

Информационные риски – это опасность возникновения убытков или ущерба в результате применения организацией информационных технологий. Иными словами, ИТ-риски связаны с созданием, передачей, хранением и использованием информации с помощью электронных носителей и иных средств связи.

ИТ-риски можно разделить на две категории:

1. Риски, вызванные утечкой информации и использованием ее конкурентами или сотрудниками в целях, которые могут повредить бизнесу;
2. Риски технических сбоев работы каналов передачи информации, которые могут привести к убыткам.

Риск, связанный с ИТ[3]:

1. вероятность, что данный источник опасности использует (случайно или намеренно) конкретную уязвимость системы;
2. результат этого воздействия. ИТ риски возникают от возможных потерь или юридической ответственности из-за:
 - неавторизованного (злоумышленного или случайного) раскрытия, изменения или уничтожения информации;
 - непреднамеренных ошибок или упущений;
 - технических сбоев в связи с природными или техногенными катастрофами;
 - недостатка внимания при внедрении и эксплуатации ИТ системы.

Цель управления рисками – максимизировать их положительное влияние (открывающиеся возможности), минимизируя при этом связанные с ними негативные факторы (убытки). Работа по минимизации ИТ-рисков заключается в предупреждении несанкционированного доступа к данным, а также аварий и сбоев оборудования. Процесс минимизации ИТ-рисков следует рассматривать комплексно: сначала выявляются возможные проблемы, а затем определяется, какими способами их можно решить.

Управление рисками является стратегической задачей любой организации. Должна быть создана и поддерживаться методология управления рисками. Задача методологии – документирование общего и согласованного уровня ИТ-рисков, стратегий минимизации рисков и остаточных рисков. Любое потенциальное воздействие на достижение целей организации, вызванное незапланирован-